

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.28

# 民机变频交流电源供电特性测试系统校准技术研究

王文健, 王建强

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 概述了民用飞机电源系统发展趋势, 针对变频交流电源系统, 结合国内外研究现状, 阐述了民机变频交流电源供电特性测试系统校准技术研究的意义。依据变频交流电源供电特性测试系统的技术要求, 研究了校准方法并编写了校准规范; 基于直接数字频率合成(DDFS)、直接数字波形合成(DDWS)、宽带信号放大和滤波等技术, 研制了变频交流电源供电特性校准信号源; 依据校准方法中的工作流程及信号设置, 编制了校准程序, 形成了自动化的校准系统。最后, 将上述校准系统应用于多个主机厂、所电源试验系统, 完成了现场试验验证。通过上述研究过程, 建立了完善的民机电源供电特性测试系统校准能力, 为未来民机电网特性和用电设备供电适应性领域的研究奠定了坚实基础。

**关键词:** 电源供电特性; 校准; 基于直接数字频率合成; 直接数字波形合成

**中图分类号:** TB971

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)02-0183-07

## Research on Calibration Technology of Test System for Civil Aircraft Variable Frequency AC Power Supply Characteristic

WANG Wenjian, WANG Jianqiang

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** This paper summarizes the development trend of civil aircraft power supply system. Aiming at the variable frequency AC power supply system, the significance of the research on calibration technology of the test system for civil aircraft variable frequency AC power supply characteristic is expounded. According to the technical requirements of the test system for the characteristics of variable frequency AC power supply, the calibration method is studied and the calibration specification is compiled. Based on the technologies of direct digital frequency synthesis (DDFS), direct digital waveform synthesis (DDWS), broadband signal amplification and filtering, the calibrating signal source for power supply characteristics of variable frequency AC power supply is developed. According to the workflow and signal setting in the calibration method, the calibration program is compiled, and an automatic calibration system is formed. Finally, the above calibration system is applied to the power supply test systems of several main engine plants and institutes, and the field test verification is completed. Through the above research process, a complete calibration capability of civil aircraft power supply characteristics test system is established, which lays a solid foundation for the future research of civil aircraft power supply characteristics and power supply adaptability of electrical equipment.

**Key words:** power supply characteristic; calibration; DDFS; DDWS

## 0 引言

飞机供电系统是飞机电能的生产、变换和输配等装置组成的一个完整系统, 其作用是向飞机上的所有用电设备提供满足规定技术性能的电能, 保证用电设备的正常工作, 是现代飞机的一个重要组成部分。

飞机电源系统经历了低压直流、交流、高压直流的发展过程, 其中交流电源经历了恒速恒频、变速恒频、变速变频。随着多电技术在飞机上的广泛应用, 飞机的装机容量不断增加, 由于低压直流电源系统配电系统的重量较重, 目前在飞机上一般作为二次电源

使用; 恒频交流电源系统长期以来作为民航客机的主要电源一直使用 115 V/400 Hz 交流电, 一般通过恒速传动装置(简称恒装)使发电机恒速运行或通过电子功率变换器把变频发电机输出的变频交流电变换产生恒频交流电; 但在恒装或变频装置恒频交流电源系统可靠性、维修性、重量、经济性等方面一直存在着不同程度的缺陷; 变频交流电源系统具有结构简单、能量转换效率高、功率密度高、更易于构成变频交流启动发电系统等优点, 因此, 在最新研制的大型民用飞机上得到了应用。多电技术的发展带来飞机的用电量快速增加, 要求飞机供电系统的容量也相应增加。

在民用飞机合格审定试飞中，须按照适航标准对飞机供电系统的性能进行验证，评估其是否满足相关标准和设计规范的要求，测试系统是在试飞中取得飞机供电特性的测试数据的必要手段，按照相关测试标准以及试飞要求，飞机供电特性测试系统必须具有多通道同步高速采集，大容量数据存储的能力。为了保证测试系统测量精度准确和系统工作可靠稳定，本文建立了飞机供电特性参数测试系统校准装置，编制相应规范对测试系统进行计量校准认证，为民用飞机合格审定试飞符合性验证提供可信的数据和依据。

800 Hz) 供电特性参数测试系统的校准工作，实现电压调制及频率调制、电压瞬变、频率瞬变、可叠加畸变信号及谐波等信号的输出，并基于上位机校准程序，实现校准过程的标准化、自动化。应用示意如图 1 所示。

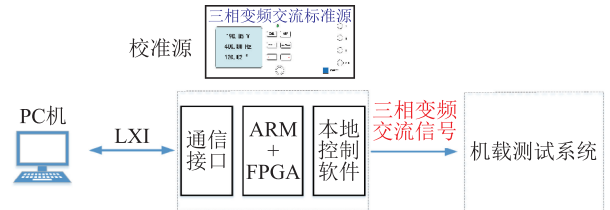


图 1 校准系统结构组成示意图

### 1 民机变频交流电源供电特性校准系统

本校准系统可完成飞机三相变频交流 115 V(360 ~

该系统的关键技术指标如表 1 所示。

表 1 校准系统技术指标

状态	参数	范围	允许误差
稳态	稳态频率	40 Hz ~ 1 kHz, 0.01 Hz 可调	≤0.02%
	稳态电压	50 ~ 200 V, 均方根值, 0.01 V 可调	≤0.1%
	相位差	110° ~ 130°, 0.01° 可调	≤0.05°
	直流分量	±1 V, 0.001 V 可调	≤0.002V
	电压调制	0.1 ~ 5 V, 均方根值	≤0.05%
	频率调制	幅度 0.1 ~ 10 Hz, 正负对称	≤0.05%
	波峰系数	1.3 ~ 1.6, 0.01 可调	≤0.01
谐波及畸变频谱	基波	50, 60, 360, 400, 600, 800 Hz	—
	谐波次数	2 ~ 20 次	—
	谐波含量	0% ~ 5%	0.2% (相对于基波额定值)
	谐波相位	0° ~ 359.99°	—
	畸变频谱频率	10 Hz ~ 1 MHz	—
瞬态	畸变频谱幅值	-35 ~ 15 dB(以均方根值 1 V 为基准)	±0.5 dB( $f \leq 50$ kHz) ±1 dB( $f > 50$ kHz)
	幅度瞬变	80 ~ 190 V, 均方根值	≤0.25%
	频率瞬变	360 ~ 800 Hz, 最大频率变化率为 250 Hz/s	≤0.05%

#### 1.1 校准系统的硬件结构

三相变频交流校准源硬件系统包含信号生成、功率放大、输出保护、自校准等几部分，总体设计方案如图 2 所示。

其中信号生成部分主要采用“ARM + FPGA + DAC”的结构，ARM 用来生成波形数据和外设接口控制等，输出 DAC 的控制基于 FPGA 芯片，采用 DDWS 方式实现基波、谐波以及畸变波形的产生，可在三相实现电压幅值、频率、相位、波峰系数可调功能，可同时实

现三相频率调制，并且可在 A 相叠加 2 ~ 20 次谐波及 10 Hz ~ 1 MHz 畸变信号，并在 A 相实现电压调制功能。

功率放大部分可实现对 FPGA 生成小信号的幅值放大，满足输出电压幅值以及负载功率的要求，其性能优劣很大程度上决定了整个系统的好坏，所以其设计必须可靠、稳定。采用线性功率放大器设计，保证在精度和谐波叠加输出等方面的性能指标。

输出保护部分实现短路过流、超温保护功能，保证校准源的安全性。通过信号采集电路对输出的电压、电

流以及散热器温度等参数实时检测并进行保护，一旦发现异常迅速做出反应。另外，三相变频交流校准源可以实现对外部模拟信号或外部畸变信号的放大功能。

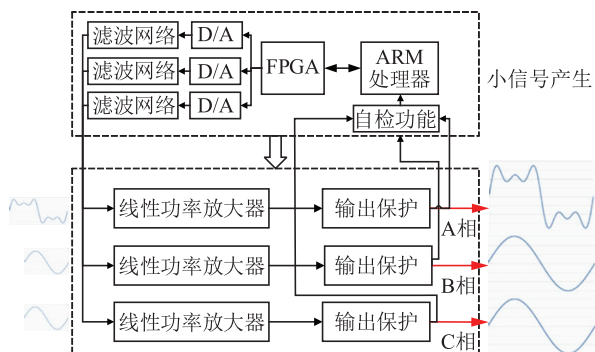


图2 校准系统总体设计方案图

### 1.1.1 基波的生成

拟采用FPGA芯片，通过直接数字频率合成(DDFS)的方式，生成正弦基波信号。DDFS输出波形频率 $f = \frac{K}{2}fe$ ，其中， $fe$ 为采样时钟频率，DDFS是通过改变频率控制字K来改变输出频率，其原理如图3所示。三相信号需要使用三个DDFS模块，通过设置相位累加器的初始值来改变各相信号的相位。

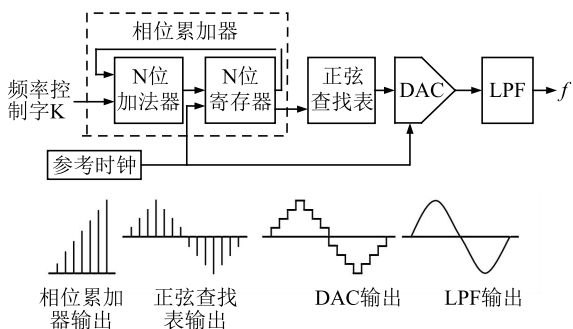


图3 DDFS的结构原理图

### 1.1.2 谐波和畸变波形的生成与叠加

各次谐波及畸变信号的产生，拟采用直接波形合成DDWS的方式，如图4所示。

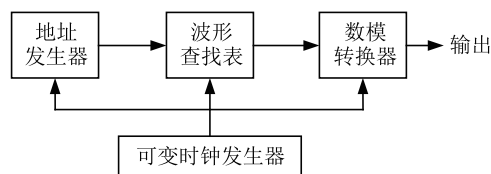


图4 DDWS的结构原理图

各次谐波及畸变信号再与基波叠加后，送入到DA中，最后再通过低通滤波器输出。

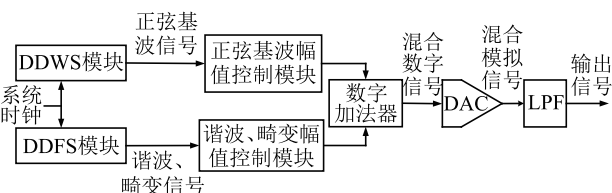


图5 基波与谐波叠加后经过DA和滤波器后生成输出小信号

精密功率放大板实现将基波、谐波预放大2.5倍，并与直流分量、畸变分量叠加，最终放大13.5倍的功能，其中基波谐波、畸变分量可分别通过继电器切换选择放大信号生成板D/A产生的信号或放大外部信号，直流分量可通过继电器选择是否叠加。每一相通道精密功率放大硬件结构如图6所示。

### 1.2 校准系统的软件结构

校准系统有本地操作模式和远程控制模式，本地操作模式主要通过前面板的按键和旋钮实现对校准源的控制，主要通过SPI实现与主控ARM的通信，而远程控制模式主要是通过上位机输入SCPI指令实现对校准源模式的切换以及参数的设置，采用的通信方式是LXI协议。系统管理的整体结构如图7所示。

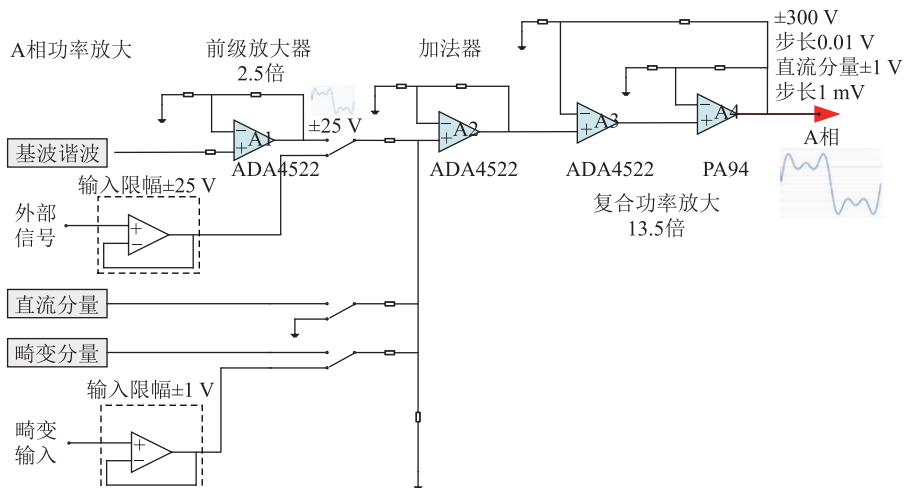


图6 精密功率放大硬件结构图

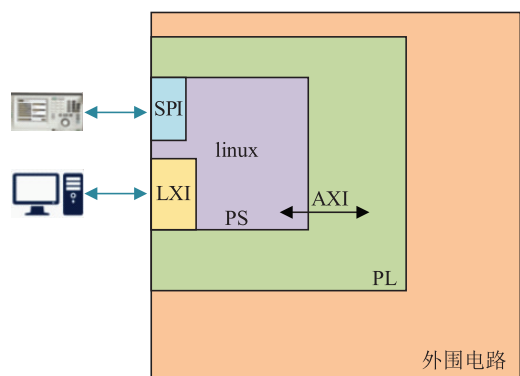


图7 系统管理结构图

首先，校准源上电启动默认处于本地操作模式，此时可以通过按键和旋钮设置校准源的输出参数，按键和旋钮的信号通过 SPI 接口传输给主控 ARM，ARM 根据接收到的控制信号对输出参数进行计算，同时根据输出参数计算波形数据并将波形数据存储在对应的 BRAM 中，此时 ARM 通过 GPIO 给 FPGA 一个上升沿，FPGA 接收到上升沿后将 BRAM 中存储的波形数据传递给数模转换器，实现波形的输出，同时将计算得到的参数实时通过 SPI 传递给 LCD 进行显示。

当上位机软件选择程控模式时，上位机通过 LXI 协议给主控 ARM 传输一个信号，ARM 接收到信号后立即放弃除 LOCAL 按键以外的任何本地按键信号接收，同时给 LCD 传输一个信号，使 LCD 显示为远程操作模式。此时上位机与校准源建立远程连接，上位机可通过输入 SCPI 指令实现校准源放大器模式和校准源模式工作状态的切换以及参数的设置。主控 ARM 接收到 SCPI 指令后首先通过 SCPI 命令解析器实现对 SCPI 指令的解析，首先根据命令判断校准源的工作模式，然后再通过解析出来的参数计算波形数据并将波形数据存到对应的 BRAM 中，其余的流程与本地操作模式相同。在这个过程中波形输出参数的数据也会实时通过 LXI 传输到上位机软件进行显示。如果此时要返回本地操作模式，只需要按下本地面板的 LOCAL 键即可恢复到本地操作模式。因为远程控制模式中存在很多本地操作模式无法实现的功能，所以当校准源切换回本地后，校准源的输出全部置零。

因为校准源的绝大部分功能都需要通过远程控制来实现，所以在设计上位机校准程序的时候需要考虑校准源的所有功能，同时还要考虑远程控制与本地操作之间的协调。

如图 8 所示，为上位机校准程序启动后连接校准

源的界面，需要通过输入校准源的 IP 地址发现仪器并连接。连接完成以后就可以进入上位机控制界面，上位机控制界面如图 9 所示，主要分为参数设置模块、功能切换模块、SCPI 指令输入模块和仪器信息显示模块，其中参数设置模块主要用于对校准源基本参数进行设置；功能切换模块的作用是实现校准源一系列特定的功能，如幅度调制、频率调制、幅度瞬变、频率瞬变等，针对这些特殊的功能又有单独的界面对校准源参数进行设置；SCPI 指令输入模块便于使用者根据自己的意愿通过 SCPI 指令实现一系列对仪器的操作，使校准源不再仅仅局限于界面中设定的功能；信息显示模块的作用是显示校准源当前输入的指令以及仪器返回的信息。

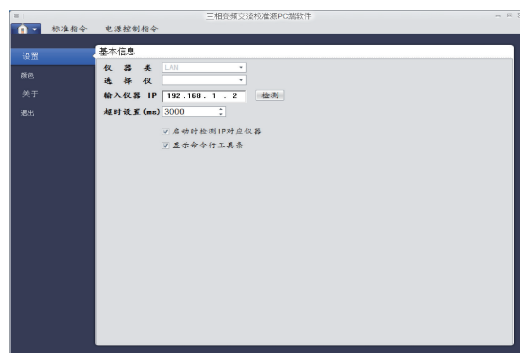


图8 上位机连接界面



图9 上位机控制界面

## 2 现场试验验证

对飞机电源供电特性测试系统进行现场试验，以验证本文研制的变频交流供电特性测试系统校准装置的应用效果。

参照国际、国内民用及军用飞机电源供电特性测试系统的要求以及针对机载产品的供电适应性要求<sup>[3-10]</sup>编写了试验大纲。现场验证试验的原理如图 10 所示。

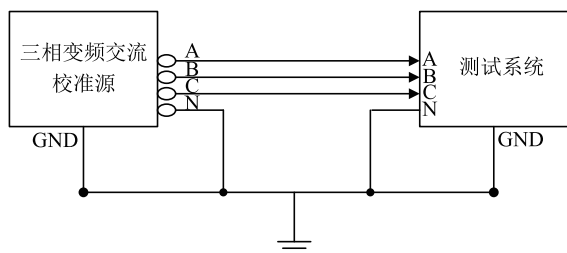


图 10 校准原理

课题组对某型飞机地面电网试验台现场校准试验的项目主要包括稳态参数(稳态交流电压、电压不平衡、电压调制幅度、电压相位差、交流电压直流分量、稳态频率、频率调制幅度、波峰系数);谐波和畸变参数(交流电压畸变系数、交流电压畸变频谱,总谐波含量);瞬态参数(交流电压瞬变、频率瞬变)。

其中,稳态参数选取频率调制和波峰系数<sup>[14]</sup>,谐波和畸变参数选取交流电压畸变频谱,瞬态参数中选取交流电压瞬变等项目,介绍现场试验的效果。

### 2.1 频率调制

校准源每一相电压幅度均设置为 115 V,基波频率和调制频率按照表 2 所列校准点进行选择;使用测试系统的频率调制测量功能测得结果并记录到表 2 中,设置下一频偏并重复上述步骤。

表 2 T-1-5-U2 模块频率调制试验结果 Hz

频率	最大频偏标准值	最大频偏测量值	误差
360	0.10	0.09	-0.01
	0.50	0.47	-0.03
	1.00	1.02	0.02
	2.00	1.94	-0.06
	5.00	4.93	-0.07
400	0.10	0.10	-0.01
	0.50	0.51	-0.03
	1.00	0.94	0.02
	2.00	1.95	-0.06
	5.00	4.92	-0.07
800	0.10	0.11	0.01
	0.50	0.46	-0.04
	1.00	1.03	0.03
	2.00	2.04	0.04
	5.00	5.06	0.06

如表 2 所示测量结果可知,测试系统得到的不同基波频率下的最大频偏测量值与校准源标准值误差可以满足标准 ISO12384 中的相关要求。

用户电网试验台稳态参数测量模块对频率调制信号的分析结果如图 11 所示。

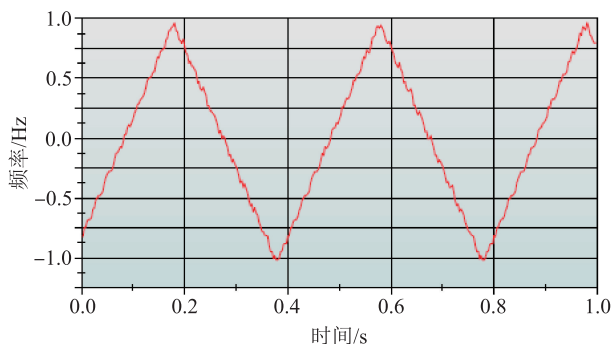


图 11 频率调制信号分析结果

### 2.2 波峰系数

校准源每一相电压幅度均设置为 115V,基波频率按照表 3 所列校准点进行选择;使用测试系统的波峰系数测量功能测得结果并记录到表 3 中,设置下一系数并重复上述步骤。

表 3 T-1-5-U2 模块波峰系数试验结果 Hz

频率	波峰系数标准值	波峰系数测量值	误差
360	1.30	1.30	0
	1.40	1.40	0
	1.50	1.50	0
400	1.30	1.30	0
	1.40	1.40	0
	1.50	1.50	0
800	1.30	1.30	0
	1.40	1.40	0
	1.50	1.50	0

如表 3 所示测量结果可知,测试系统得到的不同基波频率下的波峰系数测量值与标准值完全相符。

### 2.3 交流电压畸变频谱

校准源每一相电压幅度均设置为 115 V,基波频率以及畸变频谱频率和幅度按照表 4 所列校准点进行选择;使用测试系统的畸变频谱测量功能测得结果并记录到表 4 中,设置下一畸变幅值并重复上述步骤。

表4 T-1-5-U2 模块畸变频谱试验结果

畸变信号频率 设置值/Hz	畸变信号幅度 标准值/dBV	畸变信号幅度 测量值/dBV	误差/dB
10	-10.0	-10.0	0.0
100	-10.0	-10.0	0.0
1000	10.0	9.9	-0.1
3000	10.0	10.0	0.0
6000	10.0	10.0	0.0

表4所示畸变频谱参数测量结果表明测试系统在其能够分析的频率段内能够满足使用要求<sup>[15]</sup>。

### 2.4 交流电压幅度瞬变

校准源设置为幅度瞬变输出功能，标准波形的变化模式按照表5所列参数进行选择；使用测试系统的幅度瞬变测量功能测得结果并记录到表5中，设置下一模式并重复上述步骤。

用户电网试验台瞬变参数测量模块的分析结果如图12所示。

表5 T-1-5-U2 模块幅度瞬变试验结果

模式	测试条件	测量结果			
		开始时刻/s	结束时刻/s	最大电压/V	最小电压/V
模式一	瞬变时刻电压: 80 V; 600 ms 内维持 80 V 瞬变时刻后电压: 150 V; 600 ms 内维持 150 V	0.518	1.120	150	80
模式二	瞬变时刻电压: 80 V; 600 ms 内维持 80 V 瞬变时刻后电压: 150 V; 600 ms 内降至 80 V	0.992	1.595	150	80
模式三	瞬变时刻电压: 100 V; 600 ms 内维持 100 V 瞬变时刻后电压: 150 V; 600 ms 内降至 80 V	0.830	1.412	149.2	80

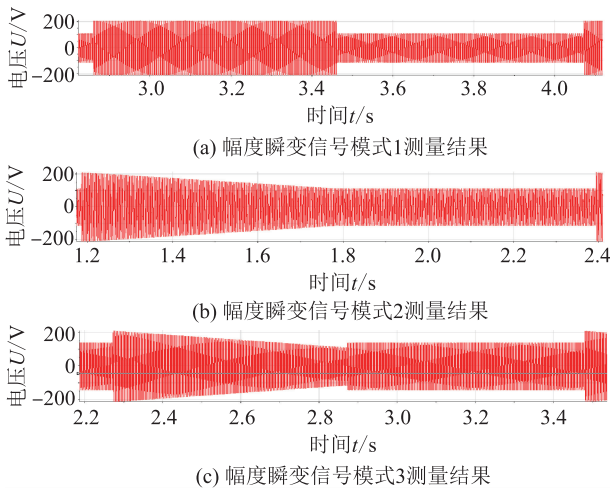


图12 用户电网试验台瞬变参数测量模块的分析结果

表5所示的幅度瞬变测试结果与测试条件中的标准信号在时间和幅度上都相符，能够满足使用要求，且可以提供整个瞬变过程的波形图，满足ISO12384中的相关要求。

## 5 结束语

本文详细阐述了民机变频交流电源供电特性测试系统校准技术的研究过程，解决了当前阶段民用

飞机主流供电系统的测试系统的校准难题，使民机电源系统的适航试验数据更加准确、可靠。同时，随着飞机上电子设备的增加，飞机电源系统势必向大功率、高度集成方向发展，致使发电机的转速越来越高，适合高速运行的新型控制系统和配电系统以及用电设备均对电源供电特性提出了新的要求，测试系统的升级换代势在必行，相应的校准技术研究已迫在眉睫。

### 参考文献

- [1] 戴卫力, 王慧贞, 严仰光, 等. 航空启动/发电系统的发展趋势与研究现状[J]. 航空科学技术, 2010(5): 28-32.
- [2] 司剑飞, 郝世勇, 战祥新. 飞机地面电源供电品质在线测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7): 116-118, 128.
- [3] ISO/TC 20/SC 1 Aerospace electrical requirements. ISO 12384: 2010 Aerospace—Requirements for digital equipment for measurements of aircraft electrical power characteristics[S]. 2010.
- [4] ISO/TC 20/SC 1 Aerospace electrical requirements. ISO 1540: 2006 Characteristics of aircraft electrical systems[S]. 2006.
- [5] 国防科学技术工业委员会. HB 7745-2004 飞机电器系统特性[S]. 2004.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. HB 8440-2014 民用飞机

- 供电特性数字式测试设备要求[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2014.
- [7] 中国人民解放军总装备部. GJB 181B - 2012 飞机供电特性[S]. 2012.
- [8] 中国人民解放军总装备部. GJB 5558 - 2006 飞机供电特性测试要求[S]. 2006.
- [9] MIL-STD - 704F 飞机供电特性[S]. 2004.
- [10] 美国国防部. MIL-HDBK - 704 - 1 验证用电设备符合飞机供电特性的测试方法指南[S]. 2004
- [11] 刘力. 变频交流电网测试及实验管理技术研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2017.
- [12] Eid A, El-Kishky H, Abdel-Salam M, et al. On Power Quality of Variable-Speed Constant-Frequency Aircraft Electric Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 55 - 65.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1001 - 2011 通用计量术语及定义[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [14] 柴艳丽, 程勤, 王剑昆. 用于飞机供电特性测试系统校准的波峰系数信号产生方法研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 37 - 40.
- [15] 王文健, 王建强. 飞机直流供电特性测试系统畸变频谱参数校准方法[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 42 - 46.

收稿日期: 2021 - 03 - 01

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJ - 2016 - J - 93)

### 作者简介



王文健(1972 -), 男, 高级工程师, 主要从事测控技术、系统测试方面的研究。主持过多项飞机电源供电特性测试系统校准以及机载设备供电适应性测试相关科研工作。



王建强(1987 -), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电磁学和无线电计量及测控技术方面的研究。参与多项飞机电源供电特性测试系统校准技术相关课题。